

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Лабораторная работа**  
**«Компьютерный количественный анализ изображений**  
**структуры наклепанных и рекристаллизованных**  
**металлов»**

Электронное методическое пособие

САМАРА  
2012

Составители: **Воронин Сергей Васильевич,**  
**Юшин Валентин Дмитриевич,**  
**Бунова Галина Захаровна**

**Лабораторная работа «Компьютерный количественный анализ изображений структуры наклепанных и рекристаллизованных металлов»** [Электронный ресурс] : электрон. метод. пособие / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. С. В. Воронин, В. Д. Юшин, Г. З. Бунова. - Электрон. текстовые и граф. дан.(0,6 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В лабораторной работе предлагаются инновационные подходы обработки изображения структур алюминиевого сплава после рекристаллизации. Данный подход позволяет студентам осваивать компьютерные системы для анализа влияния предварительной степени пластической деформации на размер рекристаллизованного зерна. В работе приведены краткие теоретические сведения по видам и механизмам деформации. Описаны процессы, происходящие при деформации на различных структурных уровнях металлов. Рассмотрено понятие наклеп и его влияние на механические свойства некоторых металлов и сплавов. Дано подробно описание явлений происходящих на всех стадиях рекристаллизационного отжига.

Учебное методическое пособие предназначено для студентов инженерно-технологического факультета по направлению подготовки бакалавров 150400.62 «Металлургия» по профилю «Обработка металлов давлением», 5 семестр и бакалавров по направлению 150700.62 «Машиностроение» по профилю «Машины и технология обработки металлов давлением», 2 семестр в рамках дисциплины «Материаловедение».

Учебное методическое пособие разработано на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения.

©Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

# Лабораторная работа

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУРЫ НАКЛЕПАННЫХ И РЕКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ

*Цель работы:* овладеть методами компьютерного количественного анализа структур наклепанных и рекристаллизованных металлов, а также теоретическими и практическими знаниями о процессах изменения структуры и свойств при пластической деформации и рекристаллизации.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### Пластическая деформация металлов и сплавов

Под воздействием внешних сил металлические тела изменяют свою форму, т.е. деформируются. При этом общая деформация может подразделяться на упругую и пластическую.

Часть общей деформации, которая полностью устраняется после снятия вызывающих ее сил, называется *упругой*. Под *пластической* деформацией подразумевается та часть общей деформации, которая остается после снятия нагрузки. Пластическая деформация объясняется необратимым смещением атомов в кристаллической решетке путем скольжения или двойникования. Атомы при этом смещаются из одних положений устойчивого равновесия в другие, что приводит к сдвигу одной части кристалла по отношению к другой.

Поверхность, по которой идет сдвиг под действием касательных напряжений, называется плоскостью скольжения. Такими плоскостями являются плоскости, наиболее плотно упакованные атомами. По этим плоскостям сдвиг идет обычно в направлении, густо усеянном атомами. Совокупность плоскостей и направлений скольжения определяют количество возможных систем скольжения. Монокристаллы с различными типами решетки имеют разное число возможных систем скольжения. Принято считать, что в гранецентрированной кубической решетке (ГЦК) – 12 систем, в объемноцентрированной кубической решетке (ОЦК) – 4, в гексагональной (ГПУ) – 3 системы (рис. 1).

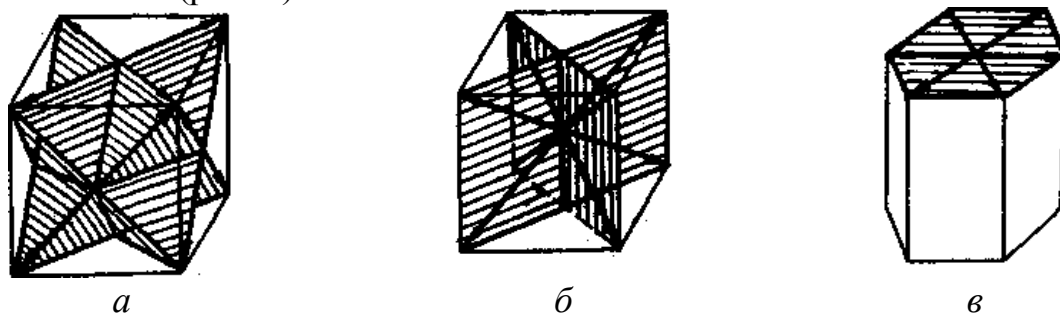


Рис. 1. Плоскости скольжения (заштрихованы): *а* – гранецентрированная кубическая решетка; *б* – объемноцентрированная кубическая решетка; *в* – гексагональная решетка

Пластическая деформация вызывает генерацию и накопление в металле

новых дислокаций. В недеформированном металле их плотность составляет  $10^6 \div 10^8$  дислокаций на  $1 \text{ см}^2$ , после деформации она может достигнуть  $10^{10} \div 10^{12}$  дислокаций на  $1 \text{ см}^2$ .

С возрастанием плотности дислокаций, они начинают взаимодействовать друг с другом и с другими видами несовершенств решетки и испытывают затруднения при своем перемещении по кристаллу. Это вызывает увеличение сопротивления деформации со стороны металла, т.е. упрочнение (предел текучести и прочности – возрастает, удлинение при разрыве, ударное сопротивление – падают) (рис. 2).

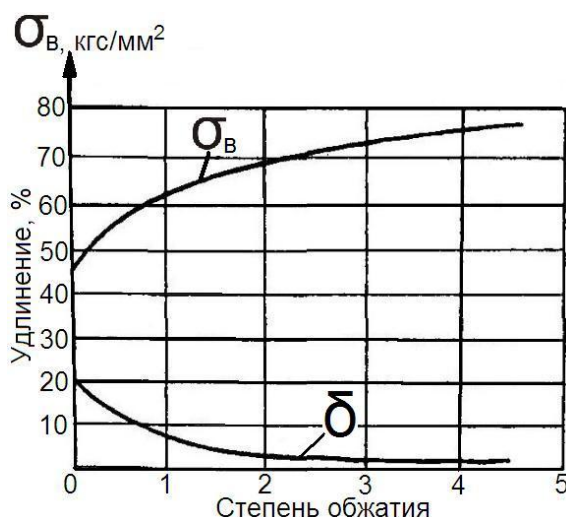


Рис. 2. Влияние холодной деформации на механические свойства железа

Процесс упрочнения под действием пластической деформации принято называть *наклепом* или *нагартовкой*. Основные отличия в условиях деформации монокристаллов от поликристаллов заключаются в том, что в поликристалле очень много различно ориентированных зерен, которые мешают деформироваться друг другу. Зерна, у которых плоскости скольжения расположены под углом  $45^\circ$  к направлению усилия, наиболее склонны к деформированию, т.к. в этих плоскостях создаются максимальные касательные напряжения. Зерна, у которых плоскости скольжения перпендикулярны или параллельны направлению усилия, не способны деформироваться, т.к. на этих плоскостях касательные напряжения равны нулю. Остальные зерна имеют промежуточную склонность к деформации. Ввиду этого в поликристаллическом теле под действием усилий зерна деформируются неодинаково. Поликристаллическое тело не только деформируется неравномерно, но и находится в неоднородном напряженном состоянии после снятия нагрузки, тому свидетельствуют исследования проведенные методом компьютерного моделирования процесса одноосного растяжения алюминиевых сплавов с учетом их структуры (рис. 3). На рисунке различными цветами показаны остаточные пластические деформации возникшие из-за неоднородности зеренной структуры. При пластической деформации в структуре происходят изменения: формы и размеров зерна; кристаллографической пространственной ориентировки

зерен; степени совершенства решетки зерен.

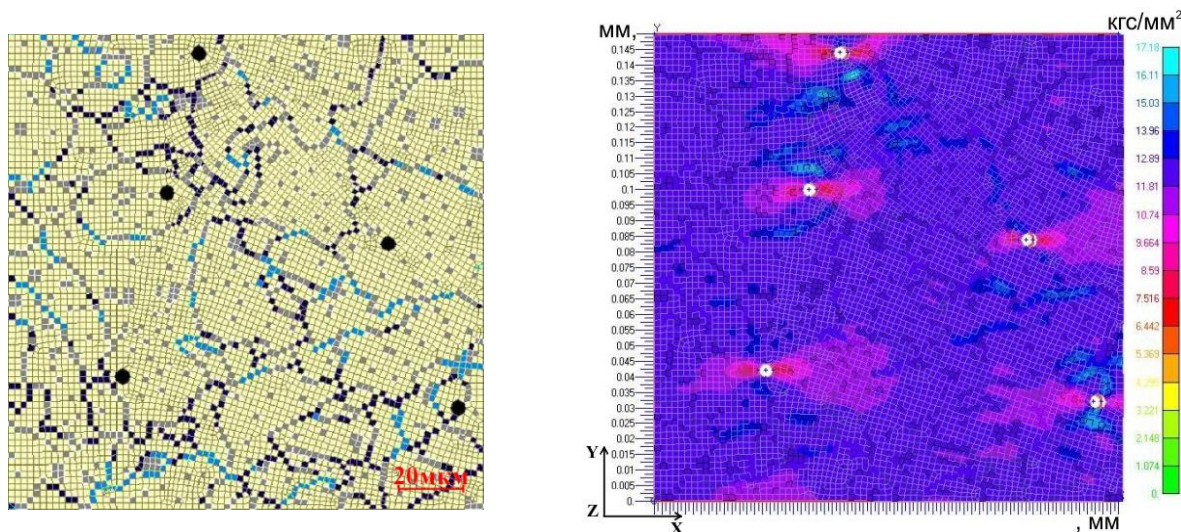


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние конечно-элементной модели образца из сплава АМгб при растяжении

Изменение формы и размеров зерен состоит в том, что они вытягиваются в направлении главной деформации растяжения и дробятся. С повышением степени деформации увеличивается и степень вытягивания зерен, структура становится волокнистой.

Изменение кристаллографической ориентации внутри зерен объясняется превашированием в процессе деформации одной или двух систем скольжения, закономерно ориентирующихся к осям деформации. В результате формируется определённая кристаллографическая ориентированность, получившая название текстуры деформации. Характер текстуры деформации зависит от вида и условий обработки давлением и от природы материала.

Изменение степени совершенства решетки заключается в резком увеличении плотности линейных, точечных и поверхностных дефектов. Так, плотность линейных дефектов – дислокаций может возрасти на несколько порядков.

В металлах и сплавах с высокой энергией дефектов упаковки (Al, Ni, Cu, Mo), где расщепление дислокаций затруднено вследствие легкости осуществления поперечного скольжения, в процессе деформации образуется ячеистая структура. Сплетения дислокаций образуют размытые стенки с высокой степенью плотности последних при низкой плотности дислокаций внутри ячеек. Хорошо оформленные ячейки называются «субзернами», а структура с субзернами – «субзеренной структурой».

Общий запас энергии металла в результате пластической деформации возрастает, его состояние становится неравновесным.

Изменение структуры в результате пластической деформации возрастает и приводит к изменению не только механических, но и физических свойств. Электропроводимость падает. У ферромагнитных металлов пластическое

деформирование ведет к понижению магнитной проницаемости и возрастанию коэрцитивной силы. Нарушение правильности кристаллического строения приводит к менее плотной упаковке атомов, т.е. уменьшению плотности. В результате неравновесного состояния деформированный металл более химически активен. Он быстрее корродирует, а также быстрее растворяется в агрессивных средах, чем недеформированный металл.

### **Возврат и рекристаллизация металлов и сплавов**

Структурное состояние деформированного металла термодинамически неустойчиво, хотя при комнатной температуре для большинства металлов может сохраняться весьма долго. Однако с повышением температуры пластически деформированный металл постепенно переходит в устойчивое состояние. Этот переход можно разбить на несколько стадий.

#### *1. Возврат:*

- а) отдых или возврат первого рода;*
- б) полигонизация или возврат второго рода.*

#### *2. Рекристаллизация:*

- а) первичная рекристаллизация обработки;*
- б) собирательная рекристаллизация;*
- в) вторичная рекристаллизация.*

Принципиальное отличие возврата от рекристаллизации заключается в том, что при возврате форма и размер зерен не изменяются и все структурные превращения происходят внутри зерна. При рекристаллизации наблюдается изменение как внутризеренного строения, так и формы и размера зерен. При отдыхе происходит уменьшение плотности точечных и линейных дефектов. При полигонизации происходит перераспределение дислокаций, приводящее к образованию дислокационных стенок, которые разбивают кристаллы на отдельные блоки, т.е. образуются «субзерна». Возврат ведет к частичному возвращению свойств недеформированного металла, а упрочнение снижается на 20÷30%.

Возврат происходит при нагреве до 0,2÷0,3 от температуры плавления по абсолютной шкале. Нагрев при более высоких температурах приводит к рекристаллизации.

Минимальная температура рекристаллизации технически чистых, сильно деформированных металлов по А. А. Бочвару приблизительно равна 0,4 от абсолютной температуры плавления. Эта температура называется порогом рекристаллизации. (Порог рекристаллизации равен для железа 450°C, меди 200°C, алюминия 150°C).

Сущность первичной рекристаллизации заключается в образовании и росте в деформированной матрице новых зерен с неискаженной решеткой. Этот процесс является типичным кристаллизационным процессом, характеризующимся возникновением центров кристаллизации и их ростом. При рекристаллизации металла полностью снимается наклеп и восстанавливаются первоначальные свойства.

При собирательной рекристаллизации, которая является продолжением первичной рекристаллизации, происходит рост одних рекристаллизованных зерен за счет других рекристаллизованных зерен. Крупные зерна растут, поглощая мелкие, что приводит к уменьшению свободной энергии и делает структуру термодинамически более устойчивой. Этот процесс идет при более высоких температурах, чем процесс рекристаллизации обработки, либо при тех же температурах, но при большей выдержке. В результате собирательной рекристаллизации структура имеет примерно равнозеренное строение.

В определенных условиях после прохождения собирательной рекристаллизации идет процесс вторичной рекристаллизации, заключающийся в неоднородном, т.е. не по всей структуре, росте отдельных зерен за счет других. Структура после вторичной рекристаллизации состоит из отдельных «гигантских» зерен, окруженных мелкими зернами.

При рекристаллизационном отжиге обычно идут первичная и собирательная рекристаллизации.

Основной структурной характеристикой рекристаллизованного металла является величина зерна, которая определяется, в основном, следующими факторами: температурой, временем отжига и степенью предварительной деформации отжигаемого металла (рис. 4). Величина зерна монотонно растет с ростом температуры отжига. Зависимость величины зерна от степени деформации имеет вид кривой с максимумом, деформация, соответствующая этому максимуму, называется критической степенью деформации. Критическая степень деформации для железа равна  $6 \div 10\%$ , для алюминия  $2 \div 3\%$ , для меди  $5 \div 7\%$ .

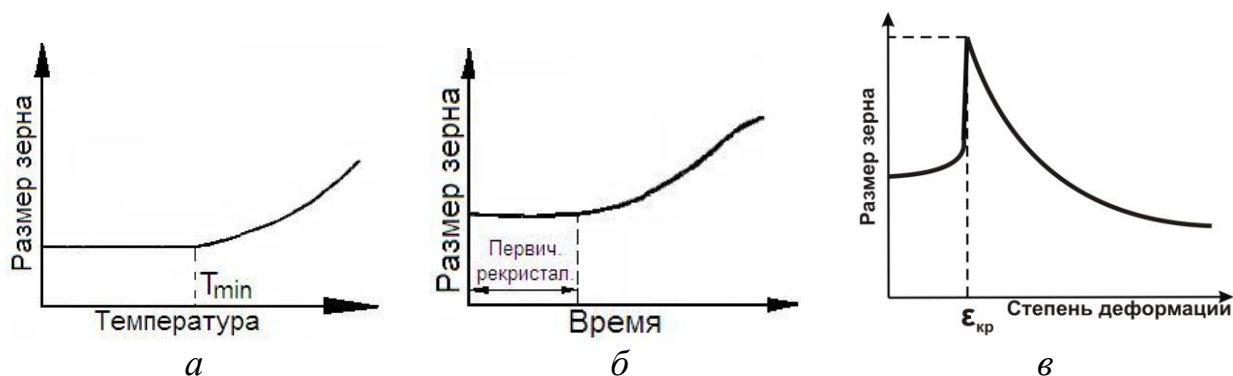


Рис. 4. Графики зависимости размера рекристаллизованного зерна от:  
*а* – температуры; *б* – времени; *в* – степени пластической деформации

### Определения размера зерна методом замеров

На первом этапе необходимо загрузить растровое изображение исследуемой микроструктуры в базу данных программы Image Expert Pro 3 (Открыть изображение) (рис. 5).





Рис. 5. Структура технически чистого алюминия

Применяя данную методику необходимо отменить функцию «Текущие измерения». Далее используя инструмент для измерения длины начинаем измерять случайно выбранные зерна в случайных направлениях указывая левой кнопкой мыши на границы. Для достоверности результатов необходимо произвести обмер  $70 \div 100$  зерен.

Затем в закладке «Данные» в разделе «Общие» появятся значения среднего размера зерна. Для более детальной проработки результатов возможно воспользоваться полученной гистограммой распределений зерен по размерам.

При исследовании влияния предварительной степени пластической деформации на размер рекристаллизованного зерна на примере технически чистого железа необходимо использовать подход определения размера зерна по методу площадей.

### **Методика обработки структуры по методу площадей**

При анализе микроструктуры технически чистого железа целесообразно использовать метод площадей для определения величины зерна. Этот метод применим для структур с четкими границами зерен.

Для предварительной обработки изображения микроструктуры выбираем «Цифровую фильтрацию», в закладке «Качественный» выбираем медианный фильтр с наименьшим радиусом анализа (равный 1), чтобы не размыть тонкие границы. Для устранения неравномерности освещения шлифа применим фильтр «Макронеоднородность» с максимальной зоной анализа (равной 50) в закладке «Спектральные» (рис. 6).

Далее для увеличения четкости границ зерен применим механизм сверток – «Сверхусиление 5x5». Для выделения сетки границ ферритных зерен произведем цветовую сегментацию изображения. Кнопкой «Выделение объектов по цвету» в окне «Сегментация по цвету» выбираем цвет маркера (красный) и ползунком диаграммы выбираем минимум, который соответствует оптимальному выбору порога преобразования.

При работе с зеренной структурой, перед применением операции, рекомендуется выбирать двухцветный режим представления результатов, поэтому выбираем «Цвета на белом фоне». Далее необходимо удалить



небольшие вкрапления в теле зерен посредством применения параметрического фильтра. Для этого нажимаем кнопку «Фильтрация объектов по геометрическим параметрам», указываем цвет анализируемых объектов (красный), в разделе «Параметры фильтрации» устанавливаем галочку на строку «Площадь объектов» и вводим верхний предел по площади для выделяемых мелких объектов (50), выбираем белый цвет, так чтобы мелкие объекты слились с фоном.

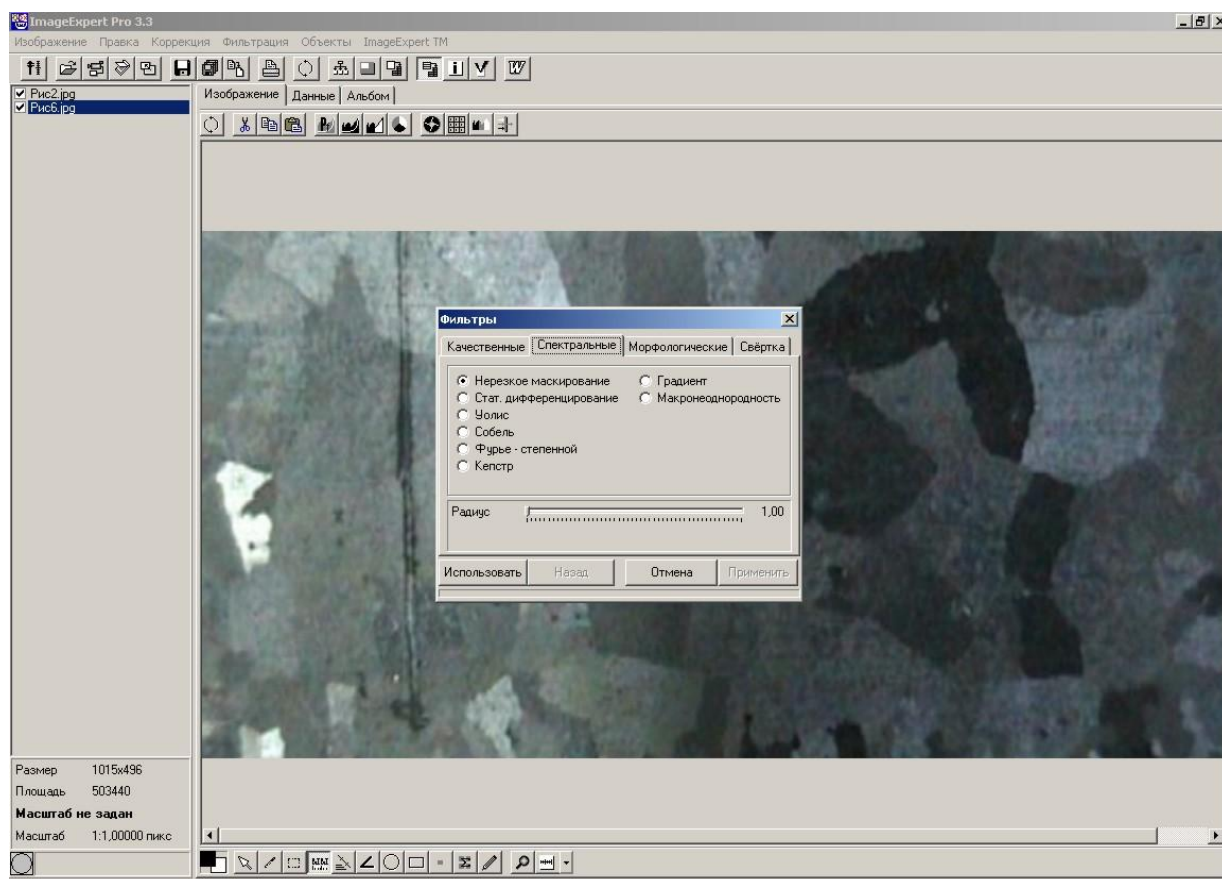


Рис. 6. Диалоговое окно «Фильтры» в программе Image Expert Pro 3

Затем необходимо провести скелетизацию – устанавливаем активный цвет, соответствующий цвету сетки границ (красный). Полученное бинаризованное изображение подвергаем обработке группой морфологических фильтров. Для этого нажимаем кнопку «Цифровая фильтрация» и в закладке «Морфологические» выбираем «Скелетизация», которая позволяет сделать границы зерен тонкими (активный цвет соответствует цвету границ).

Функция «Соединение» позволяет восстановить в ряде случаев разорванные границы зерен. Затем используется функция «Дилатация», которая вызывает равномерное расширение объектов активного цвета, что наряду с последующей повторной скелетизацией позволяет устранить немногочисленные неправильные соединения предыдущего фильтра (зона анализа равна 1).

Целесообразно повторить этот набор морфологических фильтров с

целью восстановления большего числа потерянных границ. Оставшиеся хвостики границ удаляются с помощью фильтра «Отсечение». При помощи инструмента «Пробы цвета» устанавливаем активный цвет, соответствующий цвету самих зерен (белый). Вновь открываем диалоговое окно «Фильтры» через кнопку «Цифровая фильтрация» и в закладке «Морфологические» выбираем фильтр «Удаление граничных объектов», который позволяет исключить из анализа неполные зерна, расположенные по границам поля зрения.

Произведем расчет параметров выбранных зерен белого цвета. Для этого нажимаем кнопку «Информация о всех объектах» и указываем любое зерно. Затем переходим в закладку «Данные» для анализа полученных результатов. В качестве параметра для графического построения укажем «Площадь объекта». После чего на экране появится гистограмма распределения зерен по размерам, а в разделе «Общие» будет находиться информация о среднем диаметре зерна в материале.

### **Горячая пластическая деформация**

Наряду с деформацией, проводимой ниже температуры порога рекристаллизации, часто деформацию проводят при температурах выше порога рекристаллизации. В этом случае деформация называется *горячей*. При горячей деформации эффект наклепа частично или полностью снимается вследствие прохождения одновременно с деформацией процесса рекристаллизации. Степень прохождения рекристаллизации определяется режимом деформации. Снятие наклепа позволяет значительно снизить усилие деформации и увеличить степень последней. Кроме того, горячая пластическая деформация может уплотнить металл, т.к. завариваются внутренние пустоты, если они были до деформации.

Размер зерна после горячей пластической деформации в основном определяется степенью обжатия и температурой деформации. Чем больше степень обжатия и чем ниже температура горячей деформации, тем мельче зерно в горячедеформированном металле. При горячей обработке давлением ликвирующие примеси и неметаллические включения вытягиваются в направлении деформирования и располагаются рядами между измельченными зернами сплава, образуя волокна, которые при травлении микроструктуры быстрее разъедаются и темнеют. Наилучшие механические свойства у горячедеформированных сплавов получаются вдоль направления волокнистой структуры. При горячей обработке давлением на образование структуры и свойств большое влияние оказывает температура деформации. Перегрев ведет к получению нежелательной крупнозернистой структуры, а недогрев – к повышению усилий деформирования, образованию наклепа и даже трещин.

Для стали температуру начала горячей обработки принимают на  $100 \div 200^\circ\text{C}$  ниже линии солидуса, а температуру конца обработки – на  $30 \div 50^\circ\text{C}$  выше линии  $A_3$  для доэвтектоидных и на  $30 \div 50^\circ\text{C}$  выше линии  $A_{\text{ст}}$  для заэвтектоидных сталей.

## **КОНТРОЛИРУЕМЫЙ МИНИМУМ ЗНАНИЙ**

1. Определение упругой и пластической деформаций.
2. Влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства металлов.
3. Определение понятия «наклеп».
4. Сущность явления возврата. Изменение в структуре, при отдыхе и полигонизации.
5. Сущность явления рекристаллизации. Изменение структуры и свойств при первичной, собирательной, вторичной рекристаллизациях.
6. Определение понятия температуры порога рекристаллизации.
7. Влияние на структуру, формирующуюся при рекристаллизации, температуры рекристаллизации и степени пластической деформации отжигаемого металла.
8. Критическая степень деформации и ее технологическое значение.
9. Определение горячей обработки металлов.
10. Сходство и различие между холодной и горячей обработкой давлением.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ**

### **Задачи работы**

Закрепить знания по теории явлений наклепа и рекристаллизации, их значение в практике обработки металлов давлением и последующей термообработки.

Освоить методы компьютерного количественного анализа структур наклепанных и рекристаллизованных металлов.

Установить влияние наклепа и последующего рекристаллизационного отжига на структуру и свойства металлов.

## **МАТЕРИАЛЬНОЕ ОСНАЩЕНИЕ**

1. Методическая разработка (инструкция).
2. Приспособление для растяжения листов алюминия.
3. Игла для нанесения меток.
4. Муфельная печь.
5. Образцы из листового алюминия.
6. Травитель для выявления структуры.
7. Персональный компьютер с установленным лицензионным программным обеспечением Image Expert Pro 3.
8. Микроскоп МИМ-7 с цифровой видео камерой.

## **СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Основные понятия о наклепе и рекристаллизации металлов.
2. Описание методов пластического деформирования алюминия с изображением схемы специального приспособления.
3. Результаты экспериментальной части работы:
  - а) таблицы с данными по размерам зерен алюминия для каждого деформированного и отожженного образца;
  - б) графики зависимости величины зерна после рекристаллизации от степени растяжения листового алюминия после рекристаллизационного отжига;
  - в) схемы микроструктур образца алюминия после деформирования и рекристаллизации.
4. Анализ результатов, их объяснение.

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с теорией, изложить основные положения в отчете.
2. Ознакомиться с приспособлением для вытяжки, подвергнуть образцы растяжению на 3, 6, 9, 12% и поставить на них клеймо.
3. Провести рекристаллизационный отжиг деформированных образцов в течение 30 мин при 500°C (температура берется заведомо завышенной в целях ускорения процесса).
4. Протравить отожженные образцы в 20% водном растворе едкого натрия или едкого калия 1÷2 мин для выявления макроструктуры.
5. На каждом из травленных и промытых водой образцов разметить участок величиной в 1 см<sup>2</sup> и получить растровое изображение выделенного участка.
6. Определить средний диаметр зерна методом замеров.
7. Полученные данные свести в таблицу.
8. Построить кривую зависимости величины зерна после рекристаллизации от степени деформации.
9. Для всех взятых степеней деформации зарисовать макроструктуру.
10. Дать объяснение полученным результатам.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. С. 156-193.
2. Бунова, Г. З. Авиаматериаловедение. Ч. 1 [Текст] : учеб. пособие / Г. З. Бунова, В. Д. Юшин, С. В. Воронин ; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2012.